

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2021.07.004

## 双渠道供应链中的牛鞭效应分析<sup>①</sup>

王能民<sup>1,2</sup>, 高丹丹<sup>1,2</sup>, 高杰<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学管理学院, 西安 710049; 2. 陕西省制造服务业过程挖掘工程研究中心, 西安 710049)

**摘要:** 研究价格参考效应对双渠道供应链中牛鞭效应的影响. 考虑由一个制造商和一个双渠道零售商构成的两级供应链网络, 基于价格信息对称下消费者的价格参考行为, 构建了双渠道零售商的市场需求函数, 并分析补充至目标库存策略和移动平均预测技术下的牛鞭效应及其减弱控制措施. 研究表明: 1) 价格参考效应可能会抑制双渠道供应链的牛鞭效应, 但却无法完全消除牛鞭效应; 2) 双渠道供应链中价格自回归度高的商品具有更小的牛鞭效应; 3) 当线上市场价格波动相对较大时, 线上(下)市场的价格参考系数越小(大), 则双渠道供应链的牛鞭效应越小.

**关键词:** 双渠道; 牛鞭效应; 价格参考效应; 电子商务; 供应链管理

**中图分类号:** C939 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2021)07-0066-10

### 0 引言

牛鞭效应是指订货信息在向供应链上游传播过程中的扭曲放大现象, 即下游的需求波动会引起上游订货信息更大的波动, 而造成企业利润损失、库存过量投入、生产计划紊乱和产能规划误导<sup>[1-3]</sup>. 美国斯坦福大学的 Lee 教授等最早对牛鞭效应给出正式定义并进行量化分析<sup>[2]</sup>. 在过去的二十多年里, 牛鞭效应引起了学术界和企业界的广泛关注. 自此, 越来越多的学者通过考虑更为复杂的供应链环境对牛鞭效应的产生原因及如何通过供应链的协调来实现牛鞭效应的减弱与控制进行了深入研究. 在对牛鞭效应进行建模时的五个关键因素分别为需求模型、预测技术、库存策略、提前期和信息共享策略<sup>[4]</sup>. 对需求函数的选择取决于供应链的复杂度、市场环境和研究目标等因素. 最为广泛采用的需求模型是自回归移动平均模型<sup>[5-13]</sup>; 但最近几年, 越来越多的学者开始基于价格敏感需求模型对供应链中订货信息波动进

行分析<sup>[14-21]</sup>. 由于价格敏感需求模型的参数分析(价格参考系数、需求弹性和市场规模等)更具有现实意义, 其在牛鞭效应研究领域中的应用也愈加普遍. 在牛鞭效应的研究领域, 最为广泛采用的三种预测方法分别是最小均方差、移动平均和指数平滑<sup>[1, 2, 14]</sup>. 学者们对三种预测技术对牛鞭效应的影响进行了充分的对比分析, 研究表明不同的预测技术下牛鞭效应会呈现稍许不同的性质和特征. 最小均方差具有最小的预测误差和最高的预测准确度, 但更加适合于较为简单的供应链情境<sup>[1-3]</sup>; 移动平均在供应链结构较为复杂的研究分析中的应用更为普遍, 以其简单易用性而被学者们广泛采用<sup>[6, 14]</sup>; 指数平滑相对于最小均方差和移动平均, 则更多的被应用于企业的决策分析中<sup>[7]</sup>. 因此, 当供应链情境较为复杂时, 更多的研究会采用移动平均技术对提前期需求进行预测. 库存策略的选择也会对牛鞭效应产生显著的影响. 其中, 补充至目标库存策略作为局部最优的库存策略而被广泛采用<sup>[13]</sup>. 最近几年, 学者们从

① 收稿日期: 2019-05-12; 修订日期: 2020-07-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71732006; 71572138; 71571141).

作者简介: 王能民(1974—), 男, 湖南双峰县人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: wangnm@mail.xjtu.edu.cn

供应链结构、信息共享策略和环境保护等新角度对牛鞭效应进行了扩展研究<sup>[22-24]</sup>；但是，已有的关于牛鞭效应的研究都是基于传统线下零售供应链，而对于电子商务模式下牛鞭效应的分析仍然较少<sup>[19]</sup>。

电子商务模式的兴起使得越来越多的零售商采用双渠道的营销模式，如 Apple, Uniqlo, Estee Lauder 等。双渠道的营销模式使得消费者能够获得更为全面的商品信息，包括历史折扣、价格、评价等<sup>[25]</sup>。当处于信息对称状态时，经济型的消费者会对不同销售渠道的价格进行参考和对比，从而直接影响消费者的购买决策，即价格参考效应<sup>[26-30]</sup>。价格参考大多数消费者（约 91%）的购买行为会遵循价格参考机制<sup>[26]</sup>。消费者通过对不同渠道或不同时刻的价格进行对比从而形成价格期望，这一期望价格作为消费者的价格参考进而影响消费者的购买决策<sup>[28, 29]</sup>。当参考价格低于当前所提供的价格时，会对消费者的购买意愿产生负效应，从而直接降低当期市场需求<sup>[30]</sup>。参考价格的形成通常来源于各种价格信息，包括常规价格、预售价格、历史价格、促销价格和其他渠道的价格等。在双渠道供应链中，消费者通过对不同渠道的价格对比会形成对不同平台商品价值的感知并直接影响其购买决策和购买时机<sup>[27]</sup>。双渠道供应链的出现使得原有供应链管理研究成果已不能适用于企业在新环境下的实践指导<sup>[31-33]</sup>；本文将研究双渠道供应链中的价格参考效应对供应链中的牛鞭效应影响，分析电子商务模式下牛鞭效应的形成机理及相应的协调机制，并对网上零售商的库存控制和订货管理进行决策优化。研究表明：双渠道供应链始终存在需求信息的放大效应，虽然价格参考效应可能会抑制双渠道供应链的牛鞭效应，但却无法完全消除牛鞭效应；此时，双渠道市场的价格波动比会对供应链绩效和抑制牛鞭效应产生显著的影响。

### 1 需求模型

考虑由一个制造商和一个双渠道零售商组成的两级供应链，如图 1 所示。

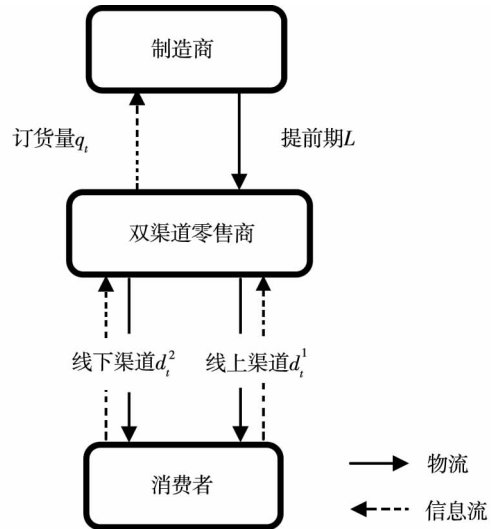


图 1 双渠道供应链网络

Fig. 1 Dual-channel supply chain network

令  $d_i^1$  和  $d_i^2$  分别为零售商的线上和线下市场需求， $p_i^1$  和  $p_i^2$  分别为零售商的线上和线下市场价格，则双渠道零售渠道的需求模型如下

$$d_i^1 = D(p_i^1, p_i^2, \varepsilon_i^1) = \alpha a - b_1 p_i^1 - r_1 b_1 (p_i^1 - p_i^2) + \varepsilon_i^1 \quad (1)$$

$$d_i^2 = D(p_i^2, p_i^1, \varepsilon_i^2) = (1 - \alpha) a - b_2 p_i^2 - r_2 b_2 (p_i^2 - p_i^1) + \varepsilon_i^2 \quad (2)$$

其中  $a > 0, b_1 > 0, b_2 > 0, 0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq r_1 < 1, 0 \leq r_2 < 1$ 。a 为双渠道零售商的市场总需求规模， $\alpha$  是其线上零售渠道的市场份额， $1 - \alpha$  是其线下零售渠道的市场份额。 $b_1$  和  $b_2$  分别为线上和线下市场的价格敏感系数， $b_i p_i^i$  为该渠道当期价格影响的需求部分。 $r_1$  和  $r_2$  分别为线上和线下市场的价格参考系数<sup>[19]</sup>，可用于描述消费者对该零售渠道的忠诚度或向其他渠道转移的程度，参考价格效应理论在运营管理领域的应用使得模型的构建更具有现实意义<sup>[34, 35]</sup>。 $r_i b_i (p_i^i - p_i^j)$  是受消费者价格参考效应所影响的需求部分。价格参考效应通常用于描述价格信息对称时的市场需求函数，如电子商务市场和双渠道市场<sup>[16, 19]</sup>。当价格信息对称时，经济型消费者会对不同渠道的市场价格进行参考对比，从而对消费者的需求产生直接的影响。如当  $p_i^1 - p_i^2 < 0$  时，即线上零售渠道的市场价格小于线下市场价格时，消费者的价格参考效应会增加线上渠道的市场需求，同时减

少线下渠道的市场需求.  $\varepsilon_t^1$  和  $\varepsilon_t^2$  分别为线上和线下零售渠道的市场需求扰动项,各自随时间独立且同正态分布,即  $\varepsilon_t^1 \sim N(0, \delta_1^2)$ ,  $\varepsilon_t^2 \sim N(0, \delta_2^2)$ . 双渠道市场需求的扰动项具有如下协方差关系  $Cov(\varepsilon_t^1, \varepsilon_{t'}^2) = \begin{cases} \delta_{12}^2, & t = t' \\ 0, & t \neq t' \end{cases}$ , 且  $\varepsilon_t^i$  和市场价格不相关,即  $Cov(\varepsilon_t^i, p_t^i) = 0$ .

假设线上和线下零售渠道的市场出清价格  $p_t^i, i = 1, 2$  为平稳过程<sup>[14-19]</sup>.

$$p_t^i = \mu_i + \rho_i p_{t-1}^i + \eta_t^i, i = 1, 2 \quad (3)$$

其中  $\mu_i$  是价格常数项,  $\mu_i > 0$ .  $\rho_i$  为价格自回归系数, Lee 等<sup>[3]</sup> 和 Erkip 等<sup>[36]</sup> 证明大多数商品的自回归系数大于零, 因此假设  $0 < \rho_i < 1$ . 价格扰动项  $\eta_t^i$  各自随时间独立且同正态分布, 即  $\eta_t^1 \sim N(0, \xi^2)$ ,  $\eta_t^2 \sim N(0, \zeta^2)$ , 且  $Cov(\eta_t^1, \eta_t^2) = 0$ . 因此, 根据上式可得价格的期望和方差如下  $\mu_p^i = \mu_i / (1 - \rho_i), i = 1, 2$ ,  $\sigma_{p,1}^2 = \xi^2 / (1 - \rho_1^2)$ ,  $\sigma_{p,2}^2 = \zeta^2 / (1 - \rho_2^2)$ . 设函数  $\Lambda_x$  为  $\Lambda_x = (1 - \rho_1^x) / (1 - \rho_1)$ ,  $x = 0, 1, 2, \dots$ , 函数  $V_x$  为  $V_x = (1 - \rho_2^x) / (1 - \rho_2), x = 0, 1, 2, \dots$ .

因此, 双渠道零售商在  $t$  期的总需求函数如下

$$d_t = a - b_1(1 + r_1)p_t^1 + r_2 b_2 p_t^2 - b_2(1 + r_2)p_t^2 + r_1 b_1 p_t^1 + \varepsilon_t^1 + \varepsilon_t^2 \quad (4)$$

## 2 订货过程

如图 1 所示, 由一个制造商和一个双渠道零售商组成的供应链系统中, 零售商在  $t - 1$  期末观察到消费者的产品需求量  $d_{t-1}$ , 并计算其  $t$  期目标库存  $y_t$ , 从而在  $t$  期初向制造商发出订货  $q_t$ , 零售商在  $t + L$  期初收到制造商的供货.

补充至目标库存策略是供应链模型中常用的库存策略之一. Gaalman 和 Disney<sup>[13]</sup> 等学者们证明当需求是正态分布时, 补充至目标库存策略是能够最小化总折现持有成本的局部最优库存策略. 由于需求和价格扰动项  $\varepsilon_t^i$  和  $\eta_t^i$  各自随时间独立且同正态分布, 因此价格和需求过程  $p_t^i$  和  $d_t$  也是正态分布. 本文假设双渠道零售商采用最优的库存策略为补充至目标策略, 其  $t$  期的订货决策如下

$$q_t = y_t - (y_{t-1} - d_{t-1}) \quad (5)$$

零售商运用补充至目标库存策略计算目标库存  $y_t$ <sup>[1, 2]</sup>

$$y_t = \hat{D}_t^L + z \hat{\sigma}_t^L \quad (6)$$

其中  $L$  为双渠道零售商的提前期,  $\hat{D}_t^L = \sum_{i=0}^{L-1} \hat{d}_{t+i}$

是提前期  $L$  内的需求预测值<sup>[1-3]</sup>, 即零售商在  $t$  期初对  $[t, t + L)$  期内的需求预测值之和,  $z$  为安全因子,  $\hat{\sigma}_t^L$  为提前期需求预测误差,

$$\hat{\sigma}_t^L = \sqrt{Var(D_t^L - \hat{D}_t^L)} \quad (3)$$

将式(6)代入式(5)中, 则订货量  $q_t$  可以表示为如下

$$q_t = \hat{D}_t^L - \hat{D}_{t-1}^L + d_{t-1} + z(\hat{\sigma}_t^L - \hat{\sigma}_{t-1}^L) \quad (7)$$

假设双渠道零售商采用移动平均技术<sup>[6, 14, 37]</sup> 来对提前期需求进行预测, 则  $t + i$  期的线上和线下市场价格预测如下

$$\hat{p}_{t+i}^1 = \sum_{j=1}^K p_{t-j}^1 / K, i = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

$$\hat{p}_{t+i}^2 = \sum_{j=1}^K p_{t-j}^2 / K, i = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

其中  $K$  为移动平均预测采用的历史数据期数. 且  $\hat{p}_t^1 = \hat{p}_{t+1}^1 = \hat{p}_{t+2}^1 = \dots$  和  $\hat{p}_t^2 = \hat{p}_{t+1}^2 = \hat{p}_{t+2}^2 = \dots$ .  $t + i$  期的双渠道零售商的市场需求预测值如下

$$\hat{d}_{t+i} = a + (r_2 b_2 - b_1(1 + r_1)) \sum_{j=1}^K p_{t-j}^1 / K + (r_1 b_1 - b_2(1 + r_2)) \sum_{j=1}^K p_{t-j}^2 / K \quad (10)$$

因此, 零售商的提前期需求预测值为

$$\hat{D}_t^L = \sum_{i=0}^{L-1} \hat{d}_{t+i} = La + (r_2 b_2 - b_1(1 + r_1))(L/K) \sum_{j=1}^K p_{t-j}^1 + (r_1 b_1 - b_2(1 + r_2))(L/K) \sum_{j=1}^K p_{t-j}^2 \quad (11)$$

将式(11)代入式(7)中, 可得

$$q_t = \hat{D}_t^L - \hat{D}_{t-1}^L + d_{t-1} + z(\hat{\sigma}_t^L - \hat{\sigma}_{t-1}^L) = d_{t-1} + (r_2 b_2 - b_1(1 + r_1))(L/K)(p_{t-1}^1 - p_{t-K-1}^1) + (r_1 b_1 - b_2(1 + r_2))(L/K)(p_{t-1}^2 - p_{t-K-1}^2) + z(\hat{\sigma}_t^L - \hat{\sigma}_{t-1}^L) \quad (12)$$

**引理 1** 当双渠道零售商采用补充至目标库存策略和移动平均预测技术时, 双渠道供应链中的提前期需求预测误差  $\hat{\sigma}_t^L$  不随时间变化且表示

为常数.

**证明** 见附录.

由引理1,将  $\hat{\sigma}_i^t - \hat{\sigma}_{i-1}^t = 0$  代入式(12),可得双渠道零售商的表达式

$$q_i = d_{i-1} + (r_2 b_2 - b_1(1+r_1))(L/K)(p_{i-1}^1 - p_{i-K-1}^1) + (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))(L/K)(p_{i-1}^2 - p_{i-K-1}^2) \quad (13)$$

### 3 牛鞭效应

$$BWE = 1 + \frac{\frac{2L}{K}\left(1 + \frac{L}{K}\right)\left(\left(r_2 b_2 - b_1(1+r_1)\right)^2(1-\rho_1^K)\sigma_{1,p}^2 + \left(r_1 b_1 - b_2(1+r_2)\right)^2(1-\rho_2^K)\sigma_{2,p}^2\right)}{\left(r_2 b_2 - b_1(1+r_1)\right)^2\sigma_{1,p}^2 + \delta_1^2 + \delta_2^2 + \left(r_1 b_1 - b_2(1+r_2)\right)^2\sigma_{2,p}^2 + \delta_{12}^2} \quad (14)$$

**证明** 见附录.

#### 3.2 不同供应链情境下牛鞭效应对比分析

**命题1** 当零售商采用补充至目标库存策略和移动平均预测技术时,无论双渠道市场需求是否存在价格参考效应,双渠道供应链中始终存在

#### 3.1 双渠道零售商的牛鞭效应

由式(12)可得双渠道零售商的牛鞭效应,如定理1所示.

**定理1** 当双渠道零售商采用补充至目标库存策略和移动平均预测技术时,双渠道供应链中的牛鞭效应可以表示为

牛鞭效应.

根据表1,在四种情境下,  $BWE > 1$  始终成立,因此可得双渠道供应链中总是存在需求信息的放大效应.

表1 不同供应链情境下的牛鞭效应

Table 1 Bullwhip effect in different supply chain contexts

| 供应链情境            | 双渠道零售市场需求模型参数            | 牛鞭效应表达式   |
|------------------|--------------------------|---|
| 不存在价格参考效应        | $r_1 = 0, r_2 = 0$       | $BWE_1 = 1 + \frac{2(L/K)(1+L/K)\left(b_1^2(1-\rho_1^K)\sigma_{1,p}^2 + b_2^2(1-\rho_2^K)\sigma_{2,p}^2\right)}{b_1^2\sigma_{1,p}^2 + b_2^2\sigma_{2,p}^2 + \delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_{12}^2}$   |
| 只有线上零售渠道存在价格参考效应 | $r_1 \neq 0, r_2 = 0$    | $BWE_2 = 1 + \frac{2(L/K)(1+L/K)\left(\left(b_1(1+r_1)\right)^2(1-\rho_1^K)\sigma_{1,p}^2 + \left(r_1 b_1 - b_2\right)^2(1-\rho_2^K)\sigma_{2,p}^2\right)}{\left(b_1(1+r_1)\right)^2\sigma_{1,p}^2 + \left(r_1 b_1 - b_2\right)^2\sigma_{2,p}^2 + \delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_{12}^2}$                                   |
| 只有线下零售渠道存在价格参考效应 | $r_1 = 0, r_2 \neq 0$    | $BWE_3 = 1 + \frac{2(L/K)(1+L/K)\left(\left(r_2 b_2 - b_1\right)^2(1-\rho_1^K)\sigma_{1,p}^2 + \left(b_2(1+r_2)\right)^2(1-\rho_2^K)\sigma_{2,p}^2\right)}{\left(r_2 b_2 - b_1\right)^2\sigma_{1,p}^2 + \left(b_2(1+r_2)\right)^2\sigma_{2,p}^2 + \delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_{12}^2}$                                   |
| 双渠道均存在价格参考效应     | $r_1 \neq 0, r_2 \neq 0$ | $BWE_4 = 1 + \frac{2(L/K)(1+L/K)\left(\left(r_2 b_2 - b_1(1+r_1)\right)^2(1-\rho_1^K)\sigma_{1,p}^2 + \left(r_1 b_1 - b_2(1+r_2)\right)^2(1-\rho_2^K)\sigma_{2,p}^2\right)}{\left(r_2 b_2 - b_1(1+r_1)\right)^2\sigma_{1,p}^2 + \left(r_1 b_1 - b_2(1+r_2)\right)^2\sigma_{2,p}^2 + \delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_{12}^2}$ |

**命题2** 当双渠道均存在价格参考效应时,即  $r_1 \neq 0, r_2 \neq 0$ ,令  $\rho_1 = \rho_2$ ,相对于不存在价格参考效应的情境,当以下条件满足时,双渠道供应链中的牛鞭效应会减小

$$(2b_1 - r_2 b_2 + r_1 b_1)(r_2 b_2 - r_1 b_1)\sigma_{1,p}^2 > (r_1 b_1 - 2b_2 - r_2 b_2)(r_1 b_1 - r_2 b_2)\sigma_{2,p}^2$$

否则,若上式不成立,则牛鞭效应会增加.

通过比较情境1和情境4可以发现,此时供

应链中的牛鞭效应始终存在.令  $BWE_4 < BWE_1$ ,可以得到双渠道供应链中价格参考效应抑制牛鞭效应的条件.在情境4下,双渠道零售市场处于竞争状态,线上线下的价格差会对两渠道的市场需求均产生显著的影响.在这种情况下,一部分经济型消费者会对不同渠道的价格进行充分的参考对比,从而选择价格较低的平台进行购买;此时,双渠道的价格参考系数都较大.

假设  $b_1 = b_2$ , 对比  $BWE_1$  和  $BWE_4$  的表达式可得, 双渠道零售市场的价格参考效应抑制牛鞭效应的条件如下

$$\frac{2 - r_2 + r_1}{2 + r_2 - r_1} > \frac{\sigma_{2,p}^2}{\sigma_{1,p}^2}$$

对双渠道零售市场的价格参考效应抑制牛鞭效应的条件做如下分析.

图2描述了当线上渠道价格波动相对于线下渠道价格波动较大(小)时, 情境四中的牛鞭效应小于(大于)情境一中的牛鞭效应的条件. 如图2所示, 当线上渠道的价格波动相对于线下渠道较小, 且给定线下市场的价格敏感系数时, 随着线上

市场的价格敏感系数的增大, 价格参考效应使得双渠道供应链的牛鞭效应得以减弱. 此时, 线上市场的价格参考系数越大, 线下市场的价格参考系数越小, 价格参考效应对牛鞭效应的抑制就越强; 反之亦然. 因此, 图2验证了命题2, 即双渠道的价格参考效应抑制供应链中牛鞭效应的条件. 考虑当双渠道市场价格敏感系数相等时的特殊情况, 当线上渠道价格波动相对于线下渠道价格波动较大(小)时, 如果线上市场价格参考系数小于(大于)线下市场价格参考系数, 则双渠道的价格参考效应能够抑制供应链中牛鞭效应; 反之, 双渠道的价格参考效应会放大供应链中牛鞭效应.

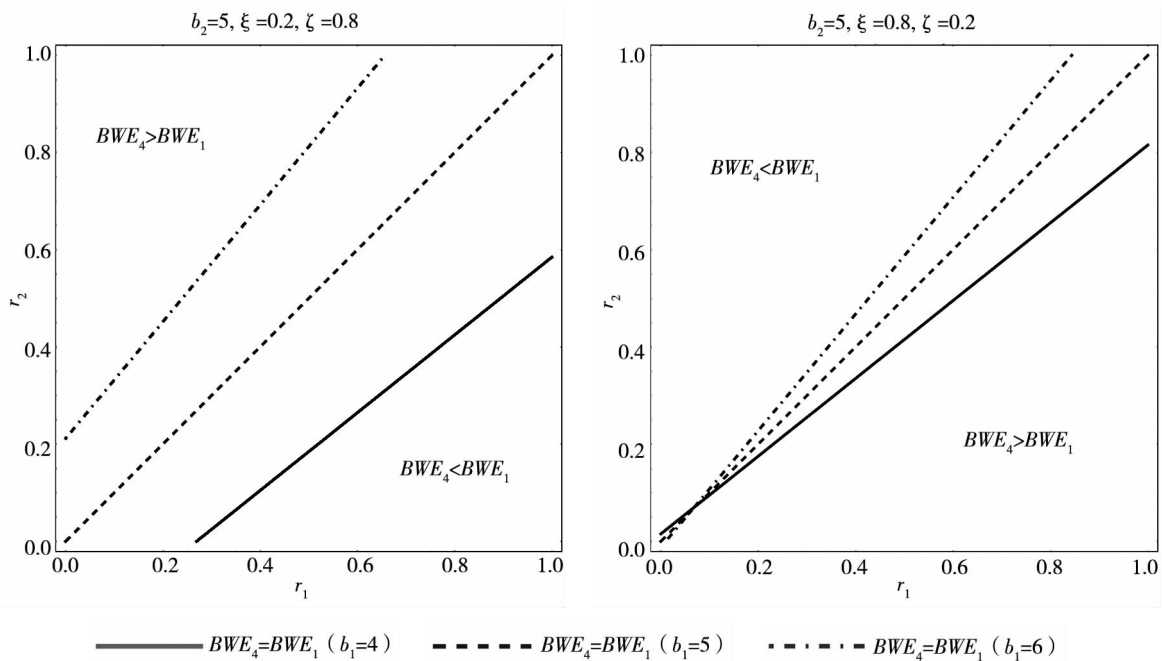


图2 价格参考效应抑制双渠道供应链牛鞭效应的条件

Fig. 2 Conditions of inhibiting bullwhip effect in a dual-channel supply chain by price

**结论 1** 虽然价格参考效应可能会抑制双渠道供应链的牛鞭效应, 但却无法完全消除牛鞭效应.

双渠道供应链由于价格参考效应始终存在需求信息的放大效应. 因此, 为了减少库存成本并提高供应链效率, 供应链上游企业应主动寻求与双渠道零售商的信息共享.

**结论 2** 当线上渠道价格波动相对于线下渠道价格波动较大(小)时, 如果线上市场价格参考系数小于(大于)线下市场价格参考系数, 则双渠道的价格参考效应会抑制供应链中的牛鞭效应.

由于电子商务中频繁的价格促销活动和网上零售商灵活的定价策略, 网上零售市场的价格波

动相较于线下市场通常更为剧烈, 若线上市场的渠道便利度远远高于线下市场, 即使消费者得知线下渠道的价格更低, 依然不得不选择线上渠道购买, 此时线上市场价格参考系数远远小于线下市场价格参考系数, 则双渠道零售市场的价格参考效应能够有效地抑制供应链中的牛鞭效应; 若消费者对线上渠道的信任度远远低于线下渠道时, 即使消费者得知线上渠道的价格更低, 依然会选择线下渠道购买, 此时线下市场价格参考系数远远小于线上市场价格参考系数, 而双渠道市场的价格参考效应会放大供应链中的牛鞭效应并增加零售商的库存成本.

## 4 牛鞭效应的影响参数分析

### 4.1 价格自回归系数的影响

**命题3** 在四种情境下,价格自回归系数对牛鞭效应的影响满足如下性质:

在区间  $(0,1)$  上,  $\partial BWE/\partial \rho_i < 0$ , 因此双渠道供应链中的牛鞭效应随着线上市场的价格自回归系数  $\rho_i$  的增加而减小.

从表1可知,令四种情境下的牛鞭效应分别对价格自回归系数求导时,可得  $\frac{\partial BWE}{\partial \rho_i} < 0, i = 1, 2$ , 因此双渠道供应链中的牛鞭效应随着线上和线下市场的价格自回归系数的增加而减小.

**结论3** 双渠道供应链中价格自回归度高的商品具有更小的牛鞭效应.

相较于价格自回归度高的商品,双渠道供应链中价格自回归度低的商品具有更大的牛鞭效应,即供应链会更容易产生需求信息变异.因此,为防库存过量投入和资源浪费,供应链上下游企

业应加强合作并制定合适的订货决策和生产计划.

### 4.2 价格参考系数的影响

情境4下的牛鞭效应分别对线上和线下市场的价格参考系数求导,可得线上和线下市场的价格参考系数对双渠道供应链中的牛鞭效应的影响性质.

**命题4** 当  $\rho_1 = \rho_2$  时,线上市场的价格参考系数  $r_i$  对双渠道供应链中的牛鞭效应的影响满足如下性质:

(a) 在区间  $(0, \infty)$  上, 当  $(r_i b_i - b_j(1+r_j)) \sigma_{j,p}^2 < (r_j b_j - b_i(1+r_i)) \sigma_{i,p}^2$  时,  $\partial BWE_4/\partial r_i < 0$ , 因此双渠道供应链中的牛鞭效应随着线上市场的价格参考系数  $r_i$  的增加而减小.

(b) 在区间  $(0, \infty)$  上, 当  $(r_i b_i - b_j(1+r_j)) \sigma_{j,p}^2 \geq (r_j b_j - b_i(1+r_i)) \sigma_{i,p}^2$  时,  $\partial BWE_4/\partial r_i \geq 0$ , 因此双渠道供应链中的牛鞭效应随着线上市场的价格参考系数  $r_i$  的增加而增加.

其中  $i = 1, 2, j = 1, 2$ , 且  $i \neq j$ .

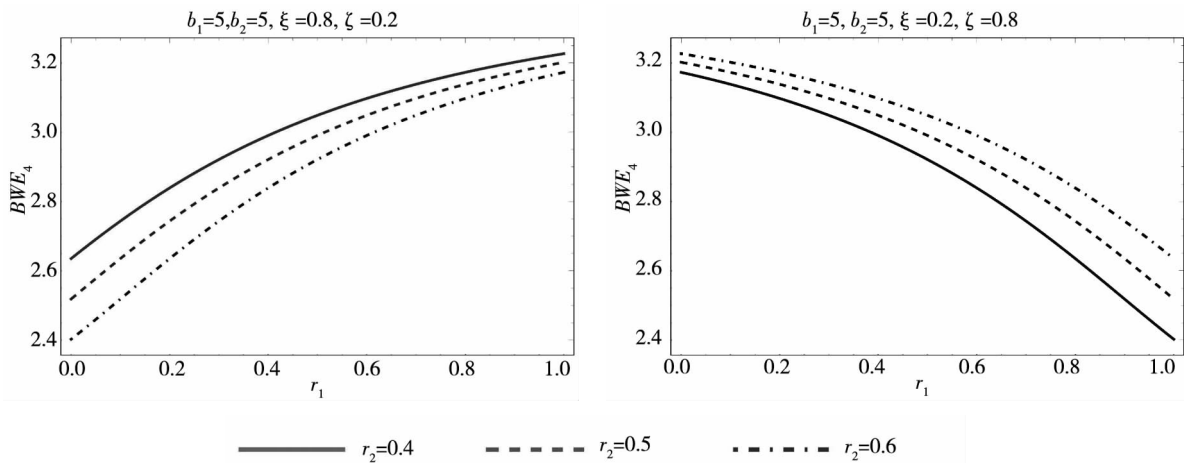


图3 价格参考系数对双渠道供应链牛鞭效应的影响

Fig. 3 Impact of price reference coefficient on bullwhip effect in a dual-channel supply chain

图3描述了当线上渠道价格波动相对于线下渠道价格波动较大(小)时,双渠道供应链中的牛鞭效应与线上和线下渠道的价格参考系数的关系.如图3所示,当线上渠道的价格波动相对于线下渠道较大时,双渠道供应链的牛鞭效应随着线上市场的价格参考系数的增大而增大,随着线下市场的价格参考系数的增大而减小.此时,线上市场的价格参考系数越小,线下市场的价格参考系

数越大,双渠道供应链的牛鞭效应就越小;反之,当线上渠道的价格波动相对于线下渠道较小时,双渠道供应链的牛鞭效应随着线上市场的价格参考系数的增大而减小,随着线下市场的价格参考系数的增大而增大.此时,线上市场的价格参考系数越大,线下市场的价格参考系数越小,双渠道供应链的牛鞭效应就越小.

**结论4** 当线上和线下市场价格方差的比值

相对较大时,当线上市场需求的价格参考系数越小,线下市场需求的价格参考系数越大时,双渠道供应链中的牛鞭效应越小。

双渠道市场的价格波动比会对供应链绩效产生显著的影响。当双渠道供应链中的线上市场价格波动相对较大时,若消费者对线上市场的渠道信任度越高,线下渠道的便利度越低时,即线上市场的价格参考系数越小,线下市场的价格参考系数越大,则双渠道供应链的牛鞭效应就越小;反之亦然。尤其当线上销售渠道为远距离的电子商务时,如跨境电子商务,网上零售商建立更好的销售信誉能够抑制供应链中的订货信息变异,降低库存成本并提高供应链效率。

#### 4.3 提前期和价格历史观察期的影响

**命题 5** 零售商订货提前期  $L$  对双渠道供应链中的牛鞭效应的影响满足如下性质:

在区间  $(0, \infty)$  上,  $\partial BWE_4 / \partial L > 0$ , 因此双渠道供应链中的牛鞭效应随着提前期  $L$  的增加而增加。

**结论 5** 零售商缩短订货提前期能有效抑制双渠道供应链中的牛鞭效应。

**命题 6** 当  $\rho_1 = \rho_2$  时, 价格历史观察期数  $K$  对双渠道供应链中的牛鞭效应的影响满足如下性质:

在区间  $(0, \infty)$  上,  $\partial BWE_4 / \partial K < 0$ , 因此双渠道供应链中的牛鞭效应随着价格历史观察期数  $K$  的增加而减小。

**结论 6** 零售商需求预测时采用更多的历史数据能减小双渠道供应链中的牛鞭效应。

## 5 结束语

本研究将消费者行为理论引入到供应链系统的分析中,研究了价格参考效应对双渠道供应链中牛鞭效应的影响。此外,通过建立价格敏感需求

模型对市场相关参数的分析更具有现实意义,如价格参考系数、需求弹性等。关于双渠道供应链中牛鞭效应的分析更能适用于企业在新环境下的实践指导,有助于管理者在不同电子商务情境下的进行供应链决策的优化。研究表明:

1) 双渠道供应链中价格参考效应抑制牛鞭效应的条件,取决于供应链中的价格参考系数、需求弹性和双渠道市场的价格波动等因素。当线上渠道价格波动相对于线下渠道价格波动较大(小)时,如果线上市场价格参考系数小于(大于)线下市场价格参考系数,则双渠道的价格参考效应能够抑制供应链中牛鞭效应。双渠道市场的价格波动比会对牛鞭效应产生显著的影响,零售商通过控制线上和线下的价格变动,可以抑制双渠道供应链中的需求信息变异。

2) 双渠道供应链始终存在需求信息的放大效应。虽然价格参考效应可能会抑制双渠道供应链的牛鞭效应,但却无法完全消除牛鞭效应。因此,为了减少库存成本并提高供应链效率,供应链上游企业应主动寻求与双渠道零售商的信息共享。

3) 相比价格自回归度高的商品,双渠道供应链中价格自回归度低的商品具有更大的牛鞭效应,即供应链会更容易产生需求信息变异。因此,为防库存过量投入和资源浪费,供应链上下游企业应加强合作并制定合适的订货决策和生产计划。

4) 双渠道市场的价格波动比会对供应链绩效产生显著的影响。当双渠道供应链中的线上市场价格波动相对较大时,供应链的牛鞭效应随着线上市场的价格参考系数的增大而增大,随着线下市场的价格参考系数的增大而减小;反之亦然。尤其当线上销售渠道为远距离的电子商务时,如跨境电子商务,网上零售商建立更好的销售信誉能够抑制供应链中的订货信息变异,降低库存成本并提高供应链效率。

#### 参 考 文 献:

- [1] Lee H L, Padmanabhan V, Whang S. The bullwhip effect in supply chains[J]. MIT Sloan Management Review, 1997, 38(3): 93 - 102.
- [2] Lee H L, Padmanabhan V, Whang S. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect[J]. Management Science, 1997, 43(4): 546 - 558.

- [3] Lee H L, So K C, Tang C S. The value of information sharing in a two-level supply chain[J]. *Management Science*, 2000, 46(5): 626–643.
- [4] Wang X, Disney S M. The bullwhip effect: Progress, trends and directions[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 250(3): 691–701.
- [5] Pastore E, Alfieri A, Zotteri G, et al. The impact of demand parameter uncertainty on the bullwhip effect[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 283(1): 94–107.
- [6] Chen F, Drezner Z, Ryan J K, et al. Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: The impact of forecasting, lead times, and information[J]. *Management Science*, 2000, 46(3): 436–443.
- [7] Chen F, Ryan J K, Simchi-Levi D. The impact of exponential smoothing forecasts on the bullwhip effect[J]. *Naval Research Logistics*, 2000, 47(4): 269–286.
- [8] Luong H T. Measure of bullwhip effect in supply chains with autoregressive demand process[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 180(3): 1086–1097.
- [9] Bray R L, Yao Y, Duan Y, et al. Ration gaming and the bullwhip effect[J]. *Operations Research*, 2019, 67(2): 453–467.
- [10] Dai H, Li J, Yan N, et al. Bullwhip effect and supply chain costs with low-and high-quality information on inventory shrinkage[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 250(2): 457–469.
- [11] Braz A C, De Mello A M, De Vasconcelos Gomes L A, et al. The bullwhip effect in closed-loop supply chains: A systematic literature review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 376–389.
- [12] 陈长彬, 盛鑫, 梁永奕. 一种减少供应链牛鞭效应的资产组合管理方法[J]. *管理科学学报*, 2016, 19(6): 33–48.  
Chen Changbin, Sheng Xin, Liang Yongyi. A portfolio management approach to reduce the bullwhip effect of the supply chain[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(6): 33–48. (in Chinese)
- [13] Gaalman G, Disney S M. State space investigation of the bullwhip problem with ARMA (1, 1) demand processes[J]. *International Journal of Production Economics*, 2006, 104(2): 327–339.
- [14] Ma Y, Wang N, Che A, et al. The bullwhip effect on product orders and inventory: A perspective of demand forecasting techniques[J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(1): 281–302.
- [15] Gao D, Wang N, Jiang B, et al. Value of information sharing in online retail supply chain considering product loss[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2020, Digital Object Identifier 10.1109/TEM.2020.3004885.
- [16] Ma Y, Wang N, He Z, et al. Analysis of the bullwhip effect in two parallel supply chains with interacting price-sensitive demands[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 243(3): 815–825.
- [17] Wang N, Lu J, Feng G, et al. The bullwhip effect on inventory under different information sharing settings based on price-sensitive demand[J]. *International Journal of Production Research*, 2016, 54(13): 1–22.
- [18] Wang N, Ma Y, He Z, et al. The impact of consumer price forecasting behaviour on the bullwhip effect[J]. *International Journal of Production Research*, 2014, 52(22): 6642–6663.
- [19] Gao D, Wang N, He Z, et al. The bullwhip effect in an online retail supply chain: A perspective of price-sensitive demand based on the price discount in e-commerce[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2017, 64(2): 134–148.
- [20] 卢继周, 冯耕中, 王能民, 等. 信息共享下库存量牛鞭效应的影响因素研究[J]. *管理科学学报*, 2017, 20(3): 137–148.  
Lu Jizhou, Feng Gengzhong, Wang Nengmin, et al. Factors affecting bullwhip effect of inventory under information sharing[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2017, 20(3): 137–148. (in Chinese)
- [21] Ma Y, Wang N, Che A, et al. The bullwhip effect under different information-sharing settings: A perspective on price-sensitive demand that incorporates price dynamics [J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(10): 3085–3116.
- [22] Raghunathan S, Tang C S, Yue X. Analysis of the bullwhip effect in a multiproduct setting with interdependent demands [J]. *Operations Research*, 2017, 65(2): 424–432.
- [23] Nagaraja C H, McElroy T. The multivariate bullwhip effect[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 267



- (1): 96 – 106.
- [24] Teunter R H, Babai M Z, Bokhorst J A C, et al. Revisiting the value of information sharing in two-stage supply chains[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 270(3): 1044 – 1052.
- [25] Basak S, Basu P, Avittathur B, et al. A game theoretic analysis of multichannel retail in the context of “showrooming” [J]. *Decision Support Systems*, 2017, 103: 34 – 45.
- [26] Moon S, Russell G J, Duvvuri S D. Profiling the reference price consumer [J]. *Journal of Retailing*, 2006, 82(1): 1 – 11.
- [27] Danziger S, Segev R. The effects of informative and non-informative price patterns on consumer price judgments[J]. *Psychology & Marketing*, 2006, 23(6): 535 – 553.
- [28] Lewis R C, Shoemaker S. Price-sensitivity measurement: A tool for the hospitality industry[J]. *Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly*, 1997, 38(2): 44 – 54.
- [29] Kalwani M U, Yim C K, Rinne H J, et al. A price expectations model of customer brand choice[J]. *Journal of Marketing Research*, 1990, 27(3): 251 – 262.
- [30] Birnbaum M H, Stegner S E. Source credibility in social judgment: Bias, expertise, and the judge’s point of view[J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1979, 37(1): 48 – 74.
- [31] 王先甲, 周亚平, 钱桂生. 生产商规模不经济的双渠道供应链协调策略选择[J]. *管理科学学报*, 2017, 20(1): 17 – 31.  
Wang Xianjia, Zhou Yaping, Qian Guisheng. The selection of dual-channel supply chain coordination strategy considering manufacturer’s diseconomies of scale[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2017, 20(1): 17 – 31. (in Chinese)
- [32] 杨磊, 张琴, 张智勇. 碳交易机制下供应链渠道选择与减排策略[J]. *管理科学学报*, 2017, 20(11): 75 – 87.  
Yang Lei, Zhang Qin, Zhang Zhiyong. Channel selection and carbon emissions reduction policies in supply chains with the cap-and-trade scheme[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2017, 20(11): 75 – 87. (in Chinese)
- [33] 毛照昉, 刘鹭, 李辉. 考虑售后服务合作的双渠道营销定价决策研究[J]. *管理科学学报*, 2019, 22(5): 47 – 56.  
Mao Zhaofang, Liu Lu, Li Hui. Pricing decision of a dual channel under after-sales service cooperation[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019, 22(5): 47 – 56. (in Chinese)
- [34] Popescu I, Wu Y. Dynamic pricing strategies with reference effects[J]. *Operations Research*, 2007, 55(3): 413 – 429.
- [35] Huh W T, Kachani S, Sadighian A. A two-stage multi-period negotiation model with reference price effect[J]. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 2010, 9(5): 443 – 475.
- [36] Erkip N, Hausman W H, Nahmias S. Optimal centralized ordering policies in multi-echelon inventory systems with correlated demands[J]. *Management Science*, 1990, 36(3): 381 – 392.
- [37] Ma J, Ma X. Measure of the bullwhip effect considering the market competition between two retailers[J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(2): 313 – 326.

## Analysis of bullwhip effect in a dual-channel supply chain

WANG Neng-min<sup>1, 2</sup>, GAO Dan-dan<sup>1, 2</sup>, GAO Jie<sup>1, 2</sup>

1. The School of Management, Xi’an Jiaotong University, Xi’an 710049, China;
2. ERC for Process Mining of Manufacturing Services in Shanxi Province, Xi’an 710049, China

**Abstract:** This paper investigates the impact of price reference effect on the bullwhip effect in a dual-channel supply chain. Considering a two-level supply chain with a manufacturer and a dual-channel retailer, a demand model based on the price reference effect is built and the bullwhip effect and its mitigating conditions are ana-

lyzed with the order-up-to inventory policy and the MA forecasting technique. The results show that: 1) the price reference effect in the dual-channel market may diminish the bullwhip effect in the supply chain, but can't eliminate it completely; 2) the bullwhip effect in the dual-channel supply chain decreases with the price auto-regression coefficient; 3) if the price volatility in online market is more drastic, the bullwhip effect increases with the price reference coefficient of the online market and decreases with that of the offline market.

**Key words:** dual-channel; bullwhip effect; price reference effect; e-commerce; supply chain management

## 附录

### 引理 1 的证明

双渠道供应链的需求预测误差为固定常数且证明如下

$$(\hat{\sigma}_i^L)^2 = \text{Var}(D_i^L - \hat{D}_i^L) = \text{Var}(D_i^L) + \text{Var}(\hat{D}_i^L) - 2\text{Cov}(D_i^L, \hat{D}_i^L)$$

其中

$$\begin{aligned} \text{Var}(D_i^L) &= \text{Var}\left(\sum_{i=0}^{L-1} d_{t+i}\right) = \sum_{i=0}^{L-1} \text{Var}(d_{t+i}) + 2 \sum_{i=0}^{L-2} \sum_{j=1}^{L-1-i} \text{Cov}(d_{t+i}, d_{t+i+j}) \\ &= L\sigma_d^2 + 2 \sum_{i=0}^{L-2} \sum_{j=1}^{L-1-i} ((r_2 b_2 - b_1(1+r_1))^2 \rho_1^j \sigma_{p,1}^2 + (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))^2 \rho_2^j \sigma_{p,2}^2) \\ &= L\sigma_d^2 + 2\rho_1 (r_2 b_2 - b_1(1+r_1))^2 \sigma_{p,1}^2 (L - A_L) / (1 - \rho_1) + 2\rho_2 (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))^2 \sigma_{p,2}^2 (L - V_L) / (1 - \rho_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(\hat{D}_i^L) &= \text{Var}\left((r_2 b_2 - b_1(1+r_1))(L/K) \sum_{j=1}^K p_{t-j}^1 + (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))(L/K) \sum_{j=1}^K p_{t-j}^2\right) = (L/K)^2 \text{Var}\left(\sum_{j=1}^K d_{t-j}\right) \\ &= (L/K)^2 (K\sigma_d^2 + 2\rho_1 (r_2 b_2 - b_1(1+r_1))^2 \sigma_{p,1}^2 (K - A_K) / (1 - \rho_1) + 2\rho_2 (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))^2 \sigma_{p,2}^2 (K - V_K) / (1 - \rho_2)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}(D_i^L, \hat{D}_i^L) &= \text{Cov}\left(\sum_{i=0}^{L-1} d_{t+i}, (r_2 b_2 - b_1(1+r_1))(L/K) \sum_{j=1}^K p_{t-j}^1 + (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))(L/K) \sum_{j=1}^K p_{t-j}^2\right) \\ &= (r_2 b_2 - b_1(1+r_1))^2 (L/K) \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=1}^K (p_{t+i}^1, p_{t-j}^1) + (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))^2 (L/K) \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=1}^K (p_{t+i}^2, p_{t-j}^2) \\ &= (r_2 b_2 - b_1(1+r_1))^2 (L/K) \rho_1 A_L A_K \sigma_{1,p}^2 + (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))^2 (L/K) \rho_2 V_L V_K \sigma_{2,p}^2 \end{aligned}$$

由此,可证  $\hat{\sigma}_i^L$  不随时间变化且为恒定常数.

证毕.

### 定理 1 的证明

双渠道供应链的牛鞭效应表达式证明如下

$$\begin{aligned} \text{Var}(q_i) &= \text{Var}(d_{t-1} + (r_2 b_2 - b_1(1+r_1))(L/K)(p_{t-1}^1 - p_{t-K-1}^1) + (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))(L/K)(p_{t-1}^2 - p_{t-K-1}^2)) \\ &= \text{Var}\left(\begin{aligned} &(r_2 b_2 - b_1(1+r_1))(1 + L/K)p_{t-1}^1 + (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))(1 + L/K)p_{t-1}^2 \\ &- (r_2 b_2 - b_1(1+r_1))(L/K)p_{t-K-1}^1 - (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))(L/K)p_{t-K-1}^2 + \varepsilon_{t-1}^1 + \varepsilon_{t-1}^2 \end{aligned}\right) \\ &= (r_2 b_2 - b_1(1+r_1))^2 (1 + L/K)^2 \sigma_{1,p}^2 + (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))^2 (1 + L/K)^2 \sigma_{2,p}^2 + \delta_1^2 + \\ &\quad (r_2 b_2 - b_1(1+r_1))^2 (L/K)^2 \sigma_{1,p}^2 + (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))^2 (L/K)^2 \sigma_{2,p}^2 + \delta_2^2 + \delta_{12}^2 - \\ &\quad 2(r_2 b_2 - b_1(1+r_1))^2 (1 + L/K)(L/K) \rho_1^K \sigma_{1,p}^2 - 2(r_1 b_1 - b_2(1+r_2))^2 (1 + L/K)(L/K) \rho_2^K \sigma_{2,p}^2 \\ \text{BWE} &= \frac{\text{Var}(q_i)}{\text{Var}(d_i)} = 1 + \frac{2(L/K)(1+L/K)((r_2 b_2 - b_1(1+r_1))^2 (1 - \rho_1^K) \sigma_{1,p}^2 + (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))^2 (1 - \rho_2^K) \sigma_{2,p}^2)}{(r_2 b_2 - b_1(1+r_1))^2 \sigma_{1,p}^2 + (r_1 b_1 - b_2(1+r_2))^2 \sigma_{2,p}^2 + \delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_{12}^2} \end{aligned}$$

由此,可得双渠道供应链的牛鞭效应.

证毕.